



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 33 09 239 C 2

⑤1 Int. Cl.⁵:
B 06 B 1/06

②1 Aktenzeichen: P 33 09 239.7-53
②2 Anmeldetag: 15. 3. 83
④3 Offenlegungstag: 20. 9. 84
④5 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 12. 9. 91

DE 33 09 239 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦3 Patentinhaber:
Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München, DE

⑦2 Erfinder:
Kleinschmidt, Peter, Dipl.-Phys., 8000 München, DE;
Meixner, Hans, Dr., 8012 Haar, DE; Eith, Gerhard,
8000 München, DE

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 23 48 189 C3
DE 20 45 152 C3
DE 20 45 108 C3
DE-AS 14 88 698
DE-AS 12 35 824
DE-OS 25 30 045
US 37 31 267
US 33 02 043

DE-Z.: Feingerätetechnik, 29. Jg., 1980, S. 316-319;
US-Z.: IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 16,
1973, S. 1899;

⑤4 Piezoelektrischer Motor

DE 33 09 239 C 2

①9 BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES

PATENTAMT

Patentschrift

DE 2530045 C 2

⑤1 Int. Cl. 4:

B06B 1/06

H 02 N 2/00

②1 Aktenzeichen: P 25 30 045.2-53
 ②2 Anmeldetag: 4. 7. 75
 ④3 Offenlegungstag: 5. 2. 76
 ④5 Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: 12. 12. 85

DE 2530045 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1

05.07.74 SU 2041484

⑦3 Patentinhaber:

Kievskij politechničeskij institut imeni 50-letija
 Velikoj Oktjabrskoj Socialističeskoj Revoljucii, Kiev,
 SU

⑦4 Vertreter:

Beetz sen., R., Dipl.-Ing.; Beetz jun., R., Dipl.-Ing.
 Dr.-Ing., Pat.-Anw., 8000 München

⑦2 Erfinder:

Vishnevsky, Vladimir Sergeevich; Kavertsev,
 Vladimir Leonidovich; Kartashev, Igor
 Alexandrovich; Lavrinenko, Vyacheslav Vasilievich;
 Nekrasov, Mikhail Makrovich; Prez, Alexei
 Alexeevich, Kiev, SU

⑤6 Im Prüfungsverfahren entgegengehaltene
 Druckschriften nach § 44 PatG:

DE-AS	14 88 698
DE-AS	12 41 371
DE-OS	20 50 922
DE-OS	20 35 587
DE-OS	19 45 448
DE-OS	19 33 659
DE-OS	18 16 728
US	35 58 936
US	34 33 009
US	33 02 043

⑤4 Elektrostriktiver Motor

DE 2530045 C 2

1

Patentansprüche:

1. Elektrostriktiver Motor mit Ständer und Rotor, von denen der Ständer mindestens einen piezoelektrischen Schwinger aufweist, der gegen die Oberfläche des Rotors in Antriebsrichtung reibschlüssig andrückbar ist, wobei der Schwinger ein Piezoelement enthält, das mit an eine Wechselspannungs-Quelle anschließbaren Elektroden auf seinen parallelen Außenflächen versehen, in Richtung senkrecht zur Elektroden-Oberfläche polarisiert, und in seiner Resonanz-Abmessung durch Abstimmung seiner Längs-Schwingungen auf die Frequenz der Wechselspannungs-Quelle ausgelegt ist, dadurch gekennzeichnet, daß der piezoelektrische Schwinger (7) zur antriebsmäßig direkten Weiterleitung der Längs-Schwingungen des Piezoelements (8) ausgebildet ist, die in Verbindung mit Querschwingungen gleicher Frequenz, die durch ihre Wechselwirkung mit dem Rotor (3) des Motors entstehen, den Rotor (3) antreiben (z. B. Fig. 2).

2. Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß im piezoelektrischen Schwinger (7) Längs- und Biegeschwingungen erregt werden (z. B. Fig. 6).

3. Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß im piezoelektrischen Schwinger (7) Längs- und Querschwingungen erregt werden (z. B. Fig. 7).

4. Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwinger (7) in einem Minimum der Schallschnelle befestigt ist.

5. Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Produkt aus Dichte mal Elastizitätsmodul des Befestigungsmaterials des Schwingers (7) mindestens zehnmal kleiner als das Produkt aus Dichte und Elastizitätsmodul des Materials des Piezoelements (8) des Schwingers (7) ist.

6. Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwinger (7) an der Berührungsstelle von Rotor (3) und Schwinger mit einer Zwischenlage (18) aus verschleißfestem Material versehen und mit dem Piezoelement (8, 8') frequenzmäßig abgestimmt ist (z. B. Fig. 2, 8, 9).

7. Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwinger (7) des Ständers als Stab mit abnehmendem Querschnitt ausgebildet ist und der Rotor (3) den Schwinger (7) am Ende des Stabes bei dessen minimalen Querschnitt berührt (z. B. Fig. 9).

8. Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichten (22) des Piezoelements (8) parallel zu den Elektroden angeordnet und untereinander parallel geschaltet sind, wobei aufeinanderfolgende Schichten (22) in entgegengesetzten Richtungen polarisiert sind (z. B. Fig. 6, 16b, 17, 18, 19).

9. Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Rotor (3) wahlweise von einem von zwei Schwingern (7', 7) angetrieben wird, wobei jeder der Schwinger den Rotor (3) in einer anderen Umlaufrichtung antreibt, und wobei die antriebsmäßige Verbiegung des ersten Schwingers (7') durch die Kraft eines Andrückelements (13) bestimmt ist und die des zweiten Schwingers (7) durch die Wirkung eines Elektromagneten (44) hergestellt wird, wodurch beide Schwinger (7', 7), die am antriebsfernen Ende gemeinsam unter einem Winkel an einer drehbar gelagerten Scheibe (42) befestigt sind, verschwenkt werden und damit der zweite Schwinger (7) mit dem Rotor (3) in Eingriff gelangt und gleich-

2

zeigt der erste Schwinger (7') vom Rotor (3) entgegen der Richtung der Kraft des Andrückelements (13) abhebt (Fig. 23).

10. Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Piezoelement (8) mindestens eine Zusatzelektrode (37) aufweist, die zum Abgriff einer Steuerspannung zur Steuerung aktiver Schaltungselemente (38, 39) dient (Fig. 20, 21).

Die Erfindung bezieht sich auf einen elektrostriktiven Motor nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Ein solcher elektrostriktiver Motor ist z. B. der DE-OS 20 35 587 zu entnehmen.

Es sind zudem mehrere andere Elektromotoren mit piezoelektrischen Schwingern bekannt geworden. Bei einer bekannten Ausführungsform (DE-AS 14 88 698) ebenfalls mit den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 1, wird ein mechanischer Biegeberesonator verwendet, dessen Abmessungen so gewählt sind, daß im Biegeberesonator zwei aufeinander senkrecht stehende Schwingungen, näherungsweise bei der gleichen Frequenz, auftreten. Bei diesem bekannten Elektromotor besteht zwischen dem Schwinger und dem Rotor ein Reibschluß.

Bei einer anderen Ausführungsform (vgl. DE-OS 19 45 448) treibt ein piezoelektrisches Biegeelement über eine Klinke ein Zahnrad an. Die Antriebsmittel unterliegen auch hier einem relativ großen Verschleiß. Diese bekannte Konstruktion ist zudem nur für die Abgabe einer geringen Leistung geeignet.

Bei wiederum einer anderen bekannten Ausführungsform (vgl. DE-OS 20 50 922) wird die Kopplung zwischen einer Schwingfeder, deren Eigenfrequenz von der Frequenz der anliegenden Wechselspannung verschieden ist, und einem Rad magnetisch bewirkt. Mit diesem Motor kann nur ein geringes Drehmoment übertragen werden. Ebenfalls nur ein kleines Drehmoment gibt eine weiter bekanntgewordene Anordnung ab (vgl. DE-OS 20 35 587). Hierbei wird ein Antriebsrad durch eine Stimmgabel in Drehung versetzt. Auch hier dient eine Klinke als Übertragungsmittel. Diese Einrichtung weist deshalb ebenfalls die bereits vorerwähnten Nachteile auf. Das gleiche trifft auf einen weiteren bekannten Elektromotor zu, der hauptsächlich als Synchronmotor zum Antrieb von Uhren verwendet wird (vgl. US-PS 33 02 043). Auch hier wird mittels einer Klinke ein Zahnrad angetrieben.

Demgegenüber ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen elektrostriktiven Motor mit den im Oberbegriff des Anspruchs 1 angegebenen Merkmalen zu schaffen, der so ausgelegt werden kann, daß er innerhalb eines weiten Leistungsbereichs, von etwa 1 Milliwatt bis über 10 Watt, Leistung abgeben kann. Gelöst wird diese Aufgabe durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 angegebenen Maßnahmen.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

Der erfindungsgemäße Elektromotor mit piezoelektrischem Schwinger gestattet es, die Kenndaten von Elektromotoren kleiner Leistung wesentlich zu verbessern. So besitzen im Vergleich mit elektromagnetischen Wechselstrommotoren die piezoelektrischen Motoren mit einer Leistung unter 10 W einen um das 2-3fache größeren Wirkungsgrad. Die Motor-Abmessungen werden auch geringer. Ein Motor kann in flacher Bauart

oder umgekehrt in Form eines in einer Richtung gestreckten Körpers hergestellt sein. Die piezoelektrischen Motoren können leicht mit kleiner Läuferdrehzahl hergestellt werden, und es entfällt die Notwendigkeit, ein Getriebe zu verwenden, welches den Elektromotor komplizierter macht und verteuert. Die piezoelektrischen Motoren besitzen ein großes Anlaufmoment an der Welle sowie eine kleine Trägheit, wodurch sie sich vorteilhaft von den elektromagnetischen Elektromotoren unterscheiden, was ihren Einsatz als Stellmotor vorteilhaft erscheinen läßt.

Die Schaffung derartiger piezoelektrischer Motoren ist als qualitativer Sprung nicht nur im Motorenbau, sondern auch insgesamt in der Elektrotechnik anzusehen. Die Möglichkeit, niedrigere Geschwindigkeiten ohne zusätzliche Getriebe zu erhalten, das Fehlen von Wicklungen und als Folge davon die außerordentliche Einfachheit in der Herstellung, die niedrigen Herstellungskosten, die mangelnde Entflammbarkeit, die mögliche Schaffung von einfachen technologiegerechten mikroskopischen Elektromotoren unter Beibehaltung der den herkömmlichen Elektromotoren mit einer Leistung über 1 W eigenen Parameter, die Einfachheit von Umformerschaltungen bei der Gleichspannungsspeisung, die Möglichkeit eines Leistungsfaktors $\cos \theta$ nahe dem Wert Eins beim Anschluß kleiner Induktivitäten, die mögliche Steuerung der Umlaufgeschwindigkeit durch Ändern von Frequenz und Spannung sowie aufgrund der Phasenbeziehungen, die mögliche einfache Stabilisierung der Umlaufgeschwindigkeit dank hoher Betriebsfrequenz, der Wirkungsgrad, der 50% überschreitet und rechnerisch den Wert 90% übersteigen kann, die hohe spezifische Leistung an der Welle, die 0,2 W/cm³ übersteigt, der weite Bereich der Leistungen an der Welle von 1 Milliwatt bis zu über 10 W — alle diese Hauptvorteile der piezoelektrischen Motoren machen sie nicht nur konkurrenzfähig gegenüber den bekannten Elektromotoren, sondern gestatten auch neue Anwendungen.

Anhand der Zeichnung wird die Erfindung beispielsweise näher erläutert. Es zeigt

Fig. 1 die grundlegende Schaltung des Elektromotors mit piezoelektrischem Schwinger;

Fig. 2 einen Elektromotor mit passivem Rotor;

Fig. 3 einen Elektromotor mit mehreren Schwingern im Ständer;

Fig. 4 einen Elektromotor in dem Rotor und Ständer an einer Lagerung befestigt sind, in Seitenansicht;

Fig. 5 den Elektromotor gemäß Fig. 4 in Draufsicht;

Fig. 6 das Schaltbild eines Reversiermotors, bei dem im Schwinger des Ständers zwei Typen der Schwingungen erregt werden;

Fig. 7 einen Elektromotor mit Erregung von Längs- und Scherschwingungen im Schwinger des Ständers;

Fig. 8 Profile von verschleißfesten, an den Schwingern zu befestigenden Zwischenlagen;

Fig. 9 einen Elektromotor, bei dem der Schwinger des Ständers einen veränderlichen Querschnitt aufweist;

Fig. 10 einen Elektromotor, bei dem der Schwinger des Ständers als Spiralwindung ausgebildet ist;

Fig. 11 einen Elektromotor, bei dem der Schwinger des Ständers eine Metallschicht enthält;

Fig. 12 die Gestaltung der Elektroden an der Oberfläche von Piezoelementen;

Fig. 13 das Piezoelement des Schwingers, das aus mehreren, in Reihe geschalteten Zonen besteht;

Fig. 14 mögliche Polarisationsarten der Piezoele-

mentzonen;

Fig. 15 die Reihenschaltung der Zonen eines im vierten Oberton der akustischen Schwingungen erregten Piezoelementes;

Fig. 16 die Schaltung der Schichten eines zweischichtigen biegsamen Piezoelementes;

Fig. 17 das zweischichtige biegsame Piezoelement mit Elektroden an den Stirnseiten;

Fig. 18 die Parallelschaltung der Elektroden eines Piezoelementes, das aus vielen Schichten besteht;

Fig. 19 die Parallelschaltung der Elektroden eines Piezoelementes, die sich an dessen Oberfläche befinden;

Fig. 20 u. Fig. 21 die einfachsten Schaltungen von Gleichspannungsumsetzern für die Speisung der Elektromotoren;

Fig. 22 einen Elektromotor mit zusätzlichen Rotoren;

Fig. 23 einen Elektromotor mit einer in Form eines Elektromagnets ausgeführten Reversiereinrichtung.

Der Elektromotor enthält einen gegenüber der Grundplatte 1 (Fig. 1) unbeweglichen Teil des Elektromotors, den Ständer 2, und einen rotierenden Teil, den Rotor 3, der am Ständer 2 in einem Lager 4 angeordnet ist. Der Elektromotor wird an eine Spannungsquelle 5 direkt oder über eine Phasenschiebereinrichtung 6, welche die elektrische Reversierung des Elektromotors besorgt, angeschlossen. Da in diesen Elektromotoren die elektrische Energie mit Hilfe von Piezoelementen in die mechanische Drehung des Läufers umgewandelt wird, werden sie piezoelektrische Motoren genannt.

Ein unbedingt notwendiges Merkmal des Elektromotors ist, daß der Ständer 2 mindestens einen Schwinger 7 (Fig. 2, 3) enthält. Der Schwinger 7 des Ständers 2 enthält ein Piezoelement 8 (Fig. 2, 3). Die Polarisationsrichtung in den Piezoelementen 8 wird in allen Figuren durch Pfeile bezeichnet. Hierbei wird unter Schwinger ein akustischer Resonator verstanden, der ein piezoelektrisches Element einschließt, welches fähig ist, mechanische Energie in Form von elastischen Schwingungen zu speichern.

Im folgenden wird der Ständer, der einen Schwinger oder mehrere Schwinger und folglich ein oder mehrere Piezoelemente enthält, piezoelektrisch aktiv genannt, wobei darunter verstanden wird, daß im Ständer durch reziproken Piezoeffekt die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische vor sich geht.

Wenn der Ständer oder der Rotor keinen Schwinger enthält, so werden in ihm keine mechanischen Schwingungen elektrisch erregt. Deswegen wird ein Ständer oder ein Rotor, der keinen oder keine Schwinger enthält, im weiteren piezoelektrisch passiv oder einfach passiv genannt.

Zur Steigerung der Leistung des Elektromotors enthält der Ständer 2 mehrere Schwinger 7, von denen jeder beispielsweise mit einem Ende an den Rotor 3 (Fig. 3) angedrückt ist.

Zur Übertragung des Drehmoments sind der Ständer 2 und der Rotor 3 aneinander angedrückt. Die Berührung erfolgt längs einer an der Oberfläche des Schwingers 7 befindlichen Geraden. Hierbei ist es zweckmäßig, daß zumindest der Rotor 3 als Körper ausgebildet ist, bei dem ein Teil der Oberfläche, der mit dem Ständer 2 in Berührung steht, durch Drehen mindestens eines Abschnitts der Geraden A-A um die Rotationsachse des Rotors 3 (Fig. 2) gebildet ist. Diese Bedingung wird z. B. erfüllt, wenn der ganze Rotor 3 als Drehkörper in bezug auf seine Rotationsachse gestaltet ist. In den Fällen, in denen die vorstehend angegebene Bedingung nicht er-

füllt wird, ist es notwendig, daß der Ständer 2 in Form eines Körpers gefertigt ist, bei dem ein Teil der Oberfläche, der mit dem Rotor 3 in Berührung steht, durch Drehen mindestens eines Abschnitts der Geraden A-A um die Rotationsachse des Rotors 3 gebildet ist.

Nach dem ersten Ausführungsbeispiel enthält der Elektromotor einen Ständer 2 (Fig. 2), zu dem ein Schwinger 7, ein Halter 9 des Schwingers 7 und ein Lager 4 gehören. Der Schwinger 7 schließt ein Piezoelement 8 ein. Das Piezoelement 8 ist in Form einer Platte mit Elektroden 10 und 11 ausgebildet, die an entgegengesetzten Seiten der Platte angeordnet sind. Anschlüsse 12 der Elektroden 10 und 11 werden an eine Spannungsquelle angeschlossen.

Das Andrücken des Ständers 2 an den Rotor 3 kommt mittels eines Andrückelements 13 zustande, das einen Teil des Ständers 2 darstellt. Die Halter 9, das Andrückelement 13 und das Lager 4 sind an dem nicht abgebildeten Gehäuse des Elektromotors befestigt. Der Rotor 3 in diesem Ausführungsbeispiel des Elektromotors ist als Zylinder 14 ausgebildet, der an einer Welle 15 befestigt ist. Hierbei steht der Rotor 3 mit dem Ständer 2 längs einer Geraden in Berührung. Da in dem betrachteten Ausführungsbeispiel des Elektromotors der Rotor 3 piezoelektrisch passiv ist, wird hier ein solcher Motor Elektromotor mit piezoelektrisch passivem Rotor oder einfach mit passivem Rotor genannt.

Je nach den Anforderungen, die an die Elektromotoren gestellt werden, können die Ausführungsformen ihres Rotors und Ständers sehr verschieden sein. Zur Vereinfachung des Aufbaus des Elektromotors ist es zweckmäßig, den Ständer 2 in Form des Schwingers 7 auszuführen und den Rotor 3 am Ständer 2 ohne Lager zu montieren.

Jedoch wird für viele Ausführungen der Schwinger 7 (Fig. 4, 5) ebenso wie die Lager 4 an der Lagerung 19 des Ständers 2 angeordnet. Hierbei wird der Schwinger 7 an der Lagerung 19 mit Hilfe einer Isolierschicht 20 befestigt, die den Schwinger 7 von der Lagerung 19 akustisch isoliert. Als Stoff für eine solche Isolierschicht 20 kann ein beliebiger harter Stoff dienen, bei welchem das Produkt aus Dichte mal Elastizitätsmodul mindestens zehnmal das Produkt aus Dichte mal Elastizitätsmodul des Materials des Schwingers 7 unterschreitet. Ein solcher Stoff ist z. B. Gummi, Kork oder Holz.

Im Ausführungsbeispiel des Elektromotors besitzt dieser bei einer Stärke der Isolierschicht 20 von 0,5 mm zufriedenstellende Kenndaten. Mit der Verbesserung der akustischen Isolation des Schwingers 7 von der Lagerung 19 steigt der Wirkungsgrad des Elektromotors, der nach Berechnungswerten den Wirkungsgrad aller bekannten Elektromotoren mit einer Leistung bis 10 W beträchtlich übersteigt.

Die Kennlinien und Parameter der Elektromotoren hängen in bedeutendem Maße von der Bauart des Schwingers ab.

Bekannt sind Schwinger mit Erregung von Längs-, Radial-, Biege-, Scher- und Torsionsschwingungen sowie Schwinger mit unterschiedlicher Kombination der aufgezählten Schwingungen (Ultrasonic transducers, Edited by Yoshimitu Kikuchi, Professor; Research Institute of Electrical Communication Tohoku University, Corona publishing company, LTD, Tokyo, 1969).

Es sei bemerkt, daß in den vorerwähnten Schwingern die akustischen Schwingungen gleichzeitig in mehreren Richtungen erregt werden. Ist beispielsweise der Schwinger 7 als Platte ausgebildet (Fig. 2), so werden die Schwingungen über die Länge, die Breite und die

Dicke der Platte gleichzeitig erregt. In den oben erwähnten Richtungen breiten sich auch elastische mechanische Wellen aus. Falls nach ihrer Abmessung in eine der genannten Richtungen eine ganze Zahl von Halbwellen mechanischer Schwingungen hineinpassen, so ist eine Resonanz der mechanischen Schwingungen zu verzeichnen. Wenn dabei in die gegebene Richtung nach der Abmessung eine Halbwelle hineinpaßt, so spricht man von der Resonanz der ersten Oberschwingung, bei zwei Halbwellen von der Resonanz der zweiten Oberschwingung, bei 3 Halbwellen der dritten Oberschwingung.

Außerdem können im Schwinger zu gleicher Zeit auch parasitäre Typen der mechanischen Schwingungen erregt werden. Die parasitären Schwingungen führen zur Abnahme des Faktors der elektromechanischen Kopplung derjenigen Schwingungen, die zur Arbeit des Elektromotors notwendig sind und Betriebsschwingungen genannt werden. Im Schwinger werden beispielsweise außer den Betriebsschwingungen wie Torsions- und Längsschwingungen, die sich längs der Mantellinie des Zylinders ausbreiten können, auch parasitäre Radialschwingungen erregt. Unter der Bezeichnung eines Schwingers, z. B. als Schwinger für Längsschwingungen wird deshalb verstanden, daß nur die Längsschwingungen die Betriebsschwingungen sind.

Es ist zweckmäßig, im Ständer 2 der Elektromotoren einen Schwinger 7 für Längsschwingungen (Fig. 2, 4, 5), und einen Schwinger mit Erregung von Längs- und Biegeschwingungen (Fig. 6) zu verwenden. In der Ausführung mit dem Schwinger in Form einer Platte (Fig. 7) ist im Ständer 2 ein Schwinger 7 mit Erregung von Längs- und Scherschwingungen verwendet.

Die Erregung von Torsionsschwingungen im Schwinger setzt die Frequenz der Speisespannung des Elektromotors herab, während die Erregung von Scher- sowie Längsschwingungen zur Erhöhung der Speisespannungsfrequenz führt.

Für Elektromotoren mit passivem Rotor (Fig. 2, 3, 4, 5), in denen nur ein Typ der akustischen Schwingungen nach einer Richtung erregt wird, ist die elektrische Reversierung des Elektromotors, d. h. die Drehrichtungsänderung des Läufers durch Umschalten der Anschlüsse nicht möglich. Deshalb werden derartige Elektromotoren zu den irreversiblen gerechnet. Elektromotoren, in deren Schwinger 7 (Fig. 6, 7) gleichzeitig zwei Schwingungstypen elektrisch erregt werden, sind Reversiermotoren, da in ihnen durch Umschalten der Herausführungen die Drehrichtung des Rotors 3 verändert werden kann.

Bei Kenntnis des Typs der zu erregenden Schwingungen und der Ausbreitungsrichtung der Welle führt man die Befestigung des Schwingers 7 an der Lagerung 19 des Ständers 2 unter minimalen Verlusten der Schallenergie durch, indem man dazu praktisch beliebig harte Stoffe verwendet. So befestigt man den Schwinger 7 an der Lagerung 19 in mindestens einem Minimum der Schallschnellen (s. »Magnetische und dielektrische Geräte«, herausgegeben von G. W. Katz, Verlag »Energi-ja«, Moskau 1964).

Es ist bekannt, daß für die Längs-, Scher- und Torsionsschwingungen die Minima der Schallschnellen sich in Abständen befinden, die ein Vielfaches der Betriebsfrequenz des Schwingers vorgebenden Abmessung sind, geteilt durch die doppelte Ordnungszahl der Oberschwingung. Hierbei wird die Betriebsfrequenz vorgegebende Abmessung in Ausbreitungsrichtung der Schallwelle bestimmt, während das erste Minimum der

Schallschnellen sich im Abstand L vom Ende des Schwingers befindet

$$L = \frac{S}{2n}$$

dabei bedeuten:

- S — die die Frequenz vorgebende Abmessung;
 n — die Ordnungszahl der Oberschwingung der Längsschwingungen.

Für Biegespannungen befindet sich das erste Minimum der Schwingungen in einem Abstand L vom Ende des Stabs, welcher angenähert nach folgender Formel bestimmt wird:

$$L = \frac{S}{2(n+1)}$$

wobei n' die Ordnungszahl der Oberschwingung der Biegeschwingungen bedeutet.

Die Befestigung der Schwinger im Minimum der Schallschnellen erfolgt mit Hilfe der als Schneiden ausgebildeten Halter 9 (Fig. 2). Der Schwinger 7 des Ständers 2 wird in ihnen z. B. eingeklebt.

Der Schwinger 7 des Ständers 2 (Fig. 2) enthält außer dem Piezoelement 8 die Zwischenlage 18 aus nicht piezoelektrischem Material. Diese Zwischenlage wird aus einem verschleißfesten Material angefertigt. Sie ist an das Piezoelement 8 zur Gewährleistung der akustischen Kopplung zwischen Rotor 3 und Ständer 2 angeschlossen und gestattet es, die Betriebsdauer des Elektromotors um ein Mehrfaches zu erhöhen. Beispielsweise überschreitet die Lebensdauer eines solchen Elektromotors mit der Zwischenlage aus Hartmetall 2000 Stunden. Falls eine Betriebsdauer von 100 Stunden ausreicht, enthält der Schwinger 7 des Ständers 2 und des Rotors 3 zur Verringerung der Anzahl von Motorteilen nur das Piezoelement 8 oder 8' (Fig. 3, 4, 5, 6, 7).

Die Form der Zwischenlage 18 muß eine maximale Zuverlässigkeit ihrer Verbindung mit dem Piezoelement 8 gewährleisten. Dazu muß sie beispielsweise nicht nur mit der Stirnfläche des Piezoelementes 8, sondern auch mit einer (Fig. 8a) oder mit zwei (Fig. 8b) Seitenflächen des als Platte ausgebildeten Piezoelementes 8 verbunden sein. Die Ausführung der Zwischenlage 18 (Fig. 8c) in Form eines Schnabels gestattet es, das Drehmoment des Elektromotors etwas zu vergrößern.

Außer dem Typ des Schwingers ist es zur eindeutigen Bestimmung der Ausführung des Elektromotors notwendig, auch die Ausführungsform des Schwingers zu definieren. Es ist technologisch am wirksamsten, den Schwinger als rechtwinklige Platte (Fig. 2, 3, 4, 5, 6, 7) auszubilden. Zur Erhöhung des Motorwirkungsgrades wird der Schwinger 7 des Ständers 2 als Stab mit abnehmendem Querschnitt oder beispielsweise als abgestufter Körper (Fig. 9) ausgebildet, wobei der Rotor 3 den Schwinger 7 am Ende dieses Stabes mit minimalem Querschnitt berührt.

Zur Verkleinerung der Abmessungen wird der Schwinger 7 des Ständers 2 in Form einer Spiralenwindung ausgebildet, zwischen deren Enden der Rotor 3 (Fig. 10) angeordnet wird. Gestrichelt ist in Fig. 10 die Lage der Spiralenwindung vor der Anordnung des Rotors 3 angedeutet.

Man muß nicht annehmen, daß das Anschließen der verschleißfesten Zwischenlage 18 (Fig. 8) die Schwin-

gerform verändert, weil diese Abweichung nicht durch die Notwendigkeit hervorgerufen ist, eine optimale Schwingerform zu erzielen, sondern eine erzwungene Maßnahme zur Verbesserung der Festigkeit der Verbindung der verschleißfesten Zwischenlagen 18 mit dem Piezoelement 8 darstellt.

Durch Kleben, Löten oder nach anderen Verfahren wird die Zwischenlage 18 zuverlässig am Piezoelement 8 befestigt, wobei auf diese Weise die akustische Kopplung zwischen ihnen sichergestellt wird.

Die betrachteten Formen der Schwinger sind die einfachsten. Es ist zweckmäßig, daß auch das Piezoelement 8 einfachste Formen annimmt und überdies der Schwingerform gleicht, d. h. es ist wünschenswert, daß das Piezoelement 8 als rechtwinklige Platte (Fig. 2, 3, 4, 5, 6, 7), als Stab mit abnehmendem Querschnitt, beispielsweise in Form eines abgestuften Körpers (Fig. 9), ausgebildet ist. Elektromotoren mit niedriger Betriebsspannung sind dann notwendig, wenn ihre Speisung von Trockenelementen und Akkumulatoren mit einer Spannung von 1–5 V zustandekommt. Für diese Elektromotoren wird der Schwinger 7 des Ständers 2 mit Erregung von Längsschwingungen und Scherschwingungen über die Dicke (Fig. 7) eingesetzt. Das Piezoelement 8 dieses Schwingers 7 ist als zweischichtige Platte mit einer Elektrode 21 zwischen den Schichten 22 des Piezoelementes 8 ausgebildet.

In dem Schwinger 7 (Fig. 11) des Ständers 2, ausgebildet als Platte, wird zur Erhöhung der Festigkeit des Schwingers an die Oberfläche einer der Elektroden 11 des Piezoelementes 8 (Fig. 11) eine Metallschicht 23 akustisch angeschlossen.

Die piezoelektrische Keramik ist billiger als kristalline piezoelektrische Materialien, weshalb sie zur praktischen Anwendung zwecks Reduzierung der Herstellungskosten des Elektromotors empfohlen wird. Jedoch besitzen die kristallinen piezoelektrischen Materialien in der Regel bessere piezoelektrische Eigenschaften, so daß in den Fällen, wenn die Anforderungen an die elektrischen Parameter der Elektromotoren wichtiger als die Herstellungskosten sind, es zweckmäßig ist, für Piezoelemente der Schwinger, ausgeführt in Form von Platten und Scheiben, kristalline Werkstoffe zu verwenden.

Unter den Piezoelektrika, die nicht zu den Seignettelektrika gehören, besitzt Quarz hohe mechanische Festigkeit und hohe mechanische Güte. Deswegen kann Quarz für Elektromotoren empfohlen werden, die eine hohe spezifische Leistung an der Welle und einen hohen Wirkungsgrad haben.

Die beschriebenen Formen der Schwinger und die Formen der Piezoelemente bestimmen noch nicht eindeutig den Typ der akustischen Schwingungen im Schwinger. Zur vollständigen Bestimmung des Schwingers muß man noch wissen, wie das Piezoelement polarisiert ist, wie die Elektroden aufgebracht und wie sie verbunden sind. Die Polarisationsrichtung wird durch den Winkel zwischen der Richtung des mittleren Polarisationsvektors und der Elektrodenebene gekennzeichnet. Wenn dabei das Piezoelement senkrecht zu seinen Elektroden polarisiert ist, so bedeutet dies, daß, wenn an diesen Elektroden ein elektrisches Feld gelegt wird, die Richtung des Vektors des elektrischen Feldes in jedem Punkt mit der Richtung des Polarisationsvektors in diesem Punkt zusammenfällt. Ist aber der Polarisationsvektor zum Vektor des elektrischen Feldes in jedem Punkt des Piezoelementes senkrecht, so ist das Piezoelement parallel den Elektroden polarisiert.

Zur Erregung von Längs- und Biegeschwingungen ist es zweckmäßig, daß mindestens ein Teil des Piezoelementes senkrecht zu seinen Elektroden polarisiert ist (Fig. 6). Für piezoelektrische Platten und Scheiben, Hohlzylinder und Spiralen, falls diese senkrecht zu den Elektroden polarisiert sind, nennt man eine solche Polarisation auch Polarisation nach der Dicke (Fig. 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11).

Die betrachteten Polarisationsbeispiele des Piezoelementes des Schwingers des Elektromotors schöpfen nicht alle Verfahren zur Polarisation der Piezoelemente aus. Alle diese Verfahren sind bekannt und lassen sich auf die folgenden Hauptprinzipien zurückführen:

1. Der Eingangsimpedanzwert des Piezoelementes des Schwingers des Elektromotors ist um so größer, je größer der Abstand L zwischen den Elektroden 10 und 11 (Fig. 12) ist, an welche das elektrische Feld gelegt wird. Beispielsweise ist von drei Ausführungen (Fig. 12) die Impedanz bei der in Fig. 12a dargestellten am kleinsten und bei der in Fig. 12c dargestellten Ausführung am größten.
2. Ist ein Probekörper nach der Dicke polarisiert, so kann man die Eingangsimpedanz des Piezoelementes vergrößern, indem man das Piezoelement 8 (Fig. 13) in Sektionen unterteilt und diese in Reihe schaltet (Fig. 13a, b). Diese Schaltung erbringt aber einen Effekt, wenn mechanische Spannungen in jeder Sektion ein und dasselbe Vorzeichen haben. Mit der Vergrößerung der Ordnungszahl der Oberschwingung (Fig. 14, 15), beginnend mit der zweiten, wechseln die mechanischen Spannungen periodisch das Vorzeichen beim Übergang durch das Minimum der mechanischen Spannungen (in den Figuren ist die Verteilung der mechanischen Spannung über die Plattenlänge gestrichelt angedeutet). Dies muß man bei der Parallelschaltung der Sektionen 24 in Betracht ziehen, indem man das Polarisationsvorzeichen der Sektionen 24 (Fig. 14a) verändert oder die Kreuzschaltung der Elektroden (Fig. 14b) benutzt.

Bei der Reihenschaltung der Sektionen 24 (Fig. 15) reicht es aus, die Elektroden 10, 11 in mehrere Teile aufzuteilen, ohne die Polarisationsrichtung zu verändern. Die betrachteten Verfahren sind zur Erregung sämtlicher Schwingungstypen im Piezoelement anwendbar, jedoch gibt es für den Fall der Erregung von Biegeschwingungen einige Besonderheiten.

Biegeformänderungen ohne Längsverformungen sind für eine zweischichtige piezoelektrische Platte (Fig. 16) zu verzeichnen, deren Schichten 22 nach der Dicke in einer Richtung polarisiert sind, wobei sie parallelgeschaltet sind. Derselbe Effekt läßt sich beobachten, wenn die Schichten 22 in Reihe geschaltet sind und ihre Polarisation in entgegengesetzten Richtungen erfolgt. Bei der Reihenschaltung der Schichten 22 steigt die Impedanz um das Vierfache im Vergleich zu deren Parallelschaltung. Eine bedeutende Vergrößerung der Eingangsimpedanz des Piezoelementes 8 wird in dem Falle beobachtet, wenn die Schichten 22 durch die Elektrode nicht getrennt sind und nach der Länge in entgegengesetzten Richtungen (Fig. 17) polarisiert sind. In diesem Fall ist ebenso wie für das einschichtige Piezoelement mit Elektroden an den Stirnseiten (Fig. 12c) der Effekt der Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische maximal. Jedoch führt eine hohe Eingangsimpedanz eines solchen Piezoelementes zur Erhöhung der

Speisespannung, was den Einsatz derartiger Piezoelemente für Elektromotoren einschränkt. Eine Verminderung der Eingangsimpedanz des Piezoelementes 8 wird durch dessen Unterteilung (Fig. 18) über die Länge in eine Reihe von Schichten 22 erreicht, welche durch die Elektroden 10, 11 mit Parallelschaltung dieser Elektroden getrennt sind. Für dünne Piezoelemente werden die Elektroden 10, 11 (Fig. 19) auf die Oberfläche der Platte zweckmäßigerweise an einer oder zwei Seiten aufgebracht.

Im Unterschied zu den bekannten Elektromotoren mit frei beweglichem Rotor, sind der Ständer und der Rotor eines piezoelektrischen Motors aneinander gedrückt. Mit Hilfe mechanischer Vorspannung wird der Rotor 3 (Fig. 10) an den Ständer 2 gedrückt, wenn der Schwinger als Spiralenwindung ausgebildet ist.

Jedoch wird in den meisten Fällen zum Andrücken des Läufers 3 an den Ständer 2 das Andrückelement 13 verwendet. Als Andrückelement 13 wird in den einfachsten Ausführungen eine Feder (Fig. 4, 5) benutzt, die an der Lagerung 19 des Schwingers 7 angebracht ist.

Als Andrückelement 13 kann eine elastische Zwischenlage oder eine Gummischur verwendet werden. Bei kleinem Drehmoment an der Welle ist als Andrückelement 13 auch die Verwendung eines Dauermagneten, der nicht abgebildet ist, möglich.

Wenn der Elektromotor zwei Paare getrennter Elektroden 10, 11 und 21, 31 (Fig. 6) besitzt, von denen jedes eine zugehörige akustische Schwingung im Piezoelement 8 des Schwingers 7 erregt, wird die elektrische Reversierung des Elektromotors durch Umschalten zweier Elektroden, beispielsweise 10, 11, zustandegebracht. Diese Umschaltung erfolgt mittels eines zweipoligen Schalters 36 (Fig. 6). An ihn ist ein Elektrodenpaar 10, 11 angeschlossen, während das zweite Paar 21, 31 unmittelbar an die Spannungsquelle 5 angeschlossen ist.

In der Regel wird der Elektromotor in die Schaltung eines Wechselrichters zum Umsetzen der Gleichspannung in die Wechselspannung mit einer Frequenz eingeschaltet, die der Resonanzfrequenz des Elektromotors (Fig. 20, 21) gleich ist. Zur Verwirklichung der Rückkopplung wird in einem solchen Wechselrichter zweckmäßigerweise mindestens eine Elektrode 37 als Rückkopplungs-Spannungsquelle verwendet. Dazu wird die Elektrode 37 an den Eingang eines Transistors 38 angeschlossen, der ein Verstärkerelement im Rückkopplungskreis des Wechselrichters (Fig. 20) darstellt. In der Schaltung des Wechselrichters mit zwei Verstärkerelementen, den Transistoren 38 (Fig. 21), ist das Piezoelement 8 für die Rückkopplung mit zwei Elektroden 37 ausgeführt. Eine solche Anordnung gestattet es, in der Schaltung das induktive Element 39 (Fig. 20) wegzulassen, das in der Schaltung mit nur einem Transistor 38 notwendig ist.

Der reversierbare Elektromotor mit zwei Elektroden 10, 11 und 21, 31 (Fig. 6) braucht nur ein Piezoelement 8 zu enthalten. In einer der möglichen Ausführungen eines solchen Elektromotors (Fig. 6) enthält er den Schwinger 7 des Ständers in Form eines zweischichtigen Piezoelementes mit zwei gesonderten Elektroden 21, 10. An jeder Ebene der Schicht 22 bilden die Elektroden im Piezoelement 8 zwei elektrisch nicht gekoppelte Zonen 28, 32. Die Polarisation der Schichten 22 in der Zone 32 ist in einer Richtung und in der Zone 28 in entgegengesetzten Richtungen zustandegebracht, wobei an den entgegengesetzten Außenflächen der Schichten 22 des Piezoelementes 8 befindliche metallisierte Überzüge miteinander verbunden sind und Elektroden 10, 21 bil-

den. Die betrachtete Ausführung des Piezoelementes 8 gestattet es, einen Schwinger 7 des Ständers 2 zu erhalten, der in der ersten Oberschwingung der Längsschwingungen entlang der Piezoelementlänge und in der höchsten Oberschwingung der Biegeschwingungen entlang der Piezoelementlänge arbeitet.

Auf der Grundlage des oben betrachteten Ausführungsbeispiels des Elektromotors wird auch ein Elektromotor mit mehreren Rotoren (Fig. 22) hergestellt. Dazu wird an einem Ständer 2 mindestens noch ein zusätzlicher Rotor 40 (40') angeordnet, der ebenfalls an den Ständer 2 angeedrückt ist. Das gegenseitige Andrücken des Ständers 2 und der Rotor 3, 40, 40' erfolgt mittels Ausnutzung der elastischen Eigenschaften des Piezoelementes 8 bei dessen vorläufiger Biegung, die beim Zusammenbau des Elektromotors vorgenommen wird. Die Verwendung mehrerer Rotoren gestattet es, das Drehmoment für mehrere Belastungen zu übertragen.

Die mechanische Reversierung kann auch in den einfachsten Ausführungen der Elektromotoren mit dem als Platte ausgebildeten Schwinger 7 des Ständers 2 bewerkstelligt werden, in welcher Platte die Längsschwingungen erregt werden. Dazu ist der Ständer 2 (Fig. 23) mit zwei Schwingern 7 versehen, die mit ihrem einen Ende an einem Gelenk 42 befestigt sind, und zwischen den anderen Enden des Schwingers 7 wird der Rotor 3 angeordnet, der an das Ende eines der Schwingen 7 durch eine Reversiereinrichtung 43 angeedrückt wird. Als Reversiereinrichtung 43 kann ein Elektromagnet 44 verwendet werden. Dazu befestigt man am Ende eines der Schwingen 7 ein Teil 44' aus einem Stoff mit ferromagnetischen Eigenschaften, das von dem Elektromagneten 44 angezogen wird und die Drehrichtungsumkehr des Elektromotors bestimmt.

Damit der Elektromotor mit elektrischer Reversierung eine optimale Phasenbeziehung zwischen den im Schwinger erregten Schwingungen hat, wird zweckmäßigerweise mindestens ein Elektrodenpaar über die Phasenschiebereinrichtung 6 (Fig. 1) eingeschaltet. Als Elektrodenpaar kommt in Frage das Elektrodenpaar 10, 21 (Fig. 7).

Es sei auch bemerkt, daß für alle piezoelektrischen Motoren wie auch für alle anderen Elektromotoren die Plätze von Läufer und Ständer ausgetauscht werden können.

Der Elektromotor arbeitet wie folgt:

Beim Anschluß des Elektromotors an die Spannungsquelle 5 (Fig. 1) wird den Elektroden 10, 11 (Fig. 2) des Piezoelementes 8 des Schwingers 7 Spannung zugeführt. Diese wird infolge des reziproken Piezoeffektes (Elektrostriktion) in mechanische Schwingungen umgewandelt, die sich über den Schwinger 7 ausbreiten und jeden Punkt dieses Schwingers mechanisch erregen. Von der Trennungsgrenze mit dem umgebenden Medium reflektiert bewegen sich die mechanischen Schwingungen in der Rückwärtsrichtung und bilden Vorwärts- und Rückwärtswellen von Schall-Schwingungen. Bei den Frequenzen, die den Resonanzfrequenzen nahekommen, bilden sämtliche direkten und reflektierten Wellen, indem sie sich summieren, eine stehende Welle der mechanischen Schwingungen. Wenn dabei über die Länge des Schwingers eine halbe Wellenlänge Platz findet, so ist eine Resonanz in der ersten Oberschwingung zu verzeichnen, wenn aber zwei Halbwellen hineinpassen, so wird eine Resonanz in der zweiten Oberschwingung der mechanischen Schwingungen beobachtet usw. Die Verteilung der Schallschnellen über die Länge des Schwingers 7 hat einen kosinusförmigen Charakter, so

daß an den Stirnseiten stets ein Maximum der Schallschwindigkeit beobachtet wird. Die im Maximum der Schallschnellen angeordnete Zwischenlage 18 überträgt die Schwingungsenergie zum Rotor 3, welche in ständige Drehung des Rotors 3 umgewandelt wird.

Auf diese Weise ist die Zwischenlage 18, die die Oberfläche des Rotors 3 berührt, gezwungen, bei ihrer Längsbewegung von der fortschreitenden Bewegung abzuweichen, und deshalb verschiebt sie sich den Kreisumfang des Rotors 3 entlang, indem sie diesen aufgrund der Reibungskräfte mitnimmt. Hierbei erhält der Rotor 3 einen Drehimpuls in der durch Pfeil in Fig. 2 gezeigten Richtung. Von der Längsbewegung abweichend empfängt die Zwischenlage 18 einen Querbewegungsimpuls, d. h. einen Biegeimpuls. Dieser Biegeimpuls, indem er von der Grenze der Berührung von Rotor 3 und Ständer 2 reflektiert wird, pflanzt sich über die Länge des Schwingers 7 mit der Geschwindigkeit der Biege wellenausbreitung fort.

Hierbei ist in einer der höchsten Oberschwingungen der Biegeschwingungen die Resonanz dieser Schwingungen zu verzeichnen. Es erweist sich also, daß die Punkte des Schwingers 7, die den Rotor 3 berühren, in zwei zueinander senkrechten Richtungen schwingen, wodurch diese Punkte elliptische Rahmen beschreiben. Im speziellen Fall, wenn sie sich längs der Kreislinie bewegen, bilden sie gleichsam eine umlaufende Welle, die, indem sie den Rotor 3 berührt, auf diesen die Drehbewegung überträgt. Je größer die Schwingungsamplitude ist, um so größer ist der Durchmesser der Welle und um so schneller rotiert der Rotor 3. Andererseits, je höher die Schwingungsfrequenz ist, desto höher ist die Drehzahl der Welle und folglich die Drehzahl des Rotors 3, und je geringer der Durchmesser des Rotors 3 ist, desto höher ist seine Drehzahl. Also hängt die Drehzahl des betrachteten Elektromotors von den Abmessungen des Rotors 3 ab. Diese Drehzahl ist der Schwingungsamplitude und -frequenz proportional. Durch Steuerung der Schwingungsamplitude und der Speisespannungsfrequenz des Elektromotors können Drehzahlen des Elektromotors von einigen Umdrehungen bis zu mehreren tausend Umdrehungen in der Minute erhalten werden.

Die oben behandelte Arbeitsweise des Elektromotors ist nicht die einzig mögliche, die seine Arbeit erläutert. Der zweiten Erläuterung des Arbeitsprinzips des Elektromotors mit passivem Rotor liegt der Verteilungseffekt zugrunde. Dieser Effekt besteht darin, daß bei der Rotation des Rotors 3 entgegen dem Uhrzeigersinn ein Verkeilen und im Uhrzeigersinn ein Loskeilen stattfindet. Der Verteilungseffekt besteht darin, daß das an den Rotor 3 angeedrückte Ende des Schwingers 7 ein Drehmoment erfährt, welches es in den Spalt zwischen dem Schwinger selbst und dem Rotor 3 hineinzieht. An einem Modell sieht es also so aus, als wenn der Schwinger 7 in einem gewissen Abstand vom Rotor befindlich und in den Spalt zwischen ihnen ein Keil eingesetzt wäre. Bei der Rotation des Rotors 3 im Uhrzeigersinn wird der Keil in den Spalt hineingezogen, und bei der Rotation des Rotors in der entgegengesetzten Richtung wird der Keil aus dem Spalt herausgestoßen. Der Verteilungseffekt führt dazu, daß bei der Vorwärtsbewegung des Endes des Schwingers 7 zusammen mit dem Rotor 3 die Reibungskräfte um vieles die bei der Rückwärtsbewegung des Schwingers auftretenden Kräfte übersteigen.

Auf diese Weise bewegt sich der Rotor 3 vorwärts, und bei der Rückwärtsbewegung gleitet das Ende des

Schwingers 7 am Rotor durch.

In den Elektromotoren mit zwei Typen elektrisch erregter Schwingungen in einem Schwinger verändert der eine Typ der Schwingungen das Andrücken des Rotors 3 an den Ständer 2, während der andere Typ der Schwingungen den Bewegungsimpuls zum Rotor 3 überträgt.

Bei einem Elektromotor, in dem im Schwinger 7 (Fig. 6) Längs- und Biegeschwingungen erzeugt werden, sorgen für die Veränderung des Andrückens von Rotor 3 und Ständer 2 die Biegeschwingungen.

Bei dem Elektromotor mit einem Schwinger 7, in dem Längs- und Scherschwingungen über die Dicke des Piezoelementes 8 (Fig. 7) erzeugt werden, bewirken die Längsschwingungen die Veränderung des Andrückens von Rotor 3 und Ständer 2.

Die Arbeit des Elektromotors mit mehreren Schwingern 7 (Fig. 3), welche am Ständer befestigt sind, unterscheidet sich nicht von der Arbeit des Elektromotors mit nur einem Schwinger 7 (Fig. 2). Jedoch steigt die Leistung an der Motorwelle proportional der Zahl der Schwingern 7 und kann einige 10 W an der Welle des Elektromotors betragen.

Der Anschluß von mehreren Rotoren 3, 40 und 40' (Fig. 22) an die Spannungsquelle erhöht ebenfalls den Gesamtwirkungsgrad des Elektromotors, da der Anteil der Nutzleistung im Verhältnis zu den Energieverlusten im Schwinger 7 zunimmt.

Das Kräftelement an der Welle des Elektromotors hängt in bedeutendem Maße vom Anpreßdruck zwischen Rotor 3 und Ständer 2 ab.

In den einfachsten Ausführungsformen, in denen der Rotor 3 (Fig. 4, 5) an den Ständer 2 an einer Stelle angeedrückt ist, wird die vom Andrückelement 13 überbrachte Kraft auf die Lager 4 übertragen und ruft deren Verschleiß hervor. Es genügt, das Andrücken von Rotor 3 und Ständer 2 an drei Stellen sicherzustellen, damit der Elektromotor ohne Lager (Fig. 3) arbeiten kann.

In den Elektromotoren, bei denen das Andrückelement 13 an der Welle 15 (Fig. 7) angebracht und zwischen dem Lager 4 und dem Rotor 3 angeordnet ist, wird aufgrund des Andrückelementes 13' eine gewisse Bremsung des Rotors 3 erzeugt.

Bei der Erregung von zwei Schwingungstypen im piezoelektrischen Reversiermotor ergibt sich nicht immer das optimale Phasenverhältnis zwischen den Typen der Schwingungen, welche die Übertragung des Bewegungsmomentes und die Veränderung des Andrückens von Rotor und Ständer zustandebringen.

Im Elektromotor mit mechanischer Reversierung (Fig. 23) besorgt der erste Schwinger 7' des Ständers 2 im Ausgangszustand die Rotation des Rotors 3 im Uhrzeigersinn. Beim Anschluß der Reversiereinrichtung erfolgt die Anziehung des Teils 44' durch den Elektromagneten 44. Die Kraft des Andrückelementes 13 überwindend, setzt er den ersten Schwinger 7' mit dem Rotor 3 außer Eingriff und bringt den zweiten Schwinger 7 in Eingriff. Auf diese Weise verändert der Rotor 3 seine Rotationsrichtung.

Eine der Besonderheiten der Elektromotoren ist die Möglichkeit ihrer Arbeit in einem weiten Bereich der Werte der elektrischen Speisespannungen. Dabei wird dies nicht durch Komplizierung der Ausführung, wie etwa Vergrößerung der Windungszahl, sondern durch die Wahl einer optimalen Ausführung des Piezoelementes selbst erreicht. Wenn beispielsweise eine Spannungsquelle mit großer Eingangsspannung benutzt wird, so wird die letztere über die Breite des Piezoele-

mentes (Fig. 12b) oder über die Länge des Piezoelementes (Fig. 12, 17) angelegt. Die Spannung nimmt um das 2-5fache zu, wenn eine Reihenschaltung der Teile des Piezoelementes verwendet wird (Fig. 13, 15, 16b).

Hierzu 13 Blatt Zeichnungen

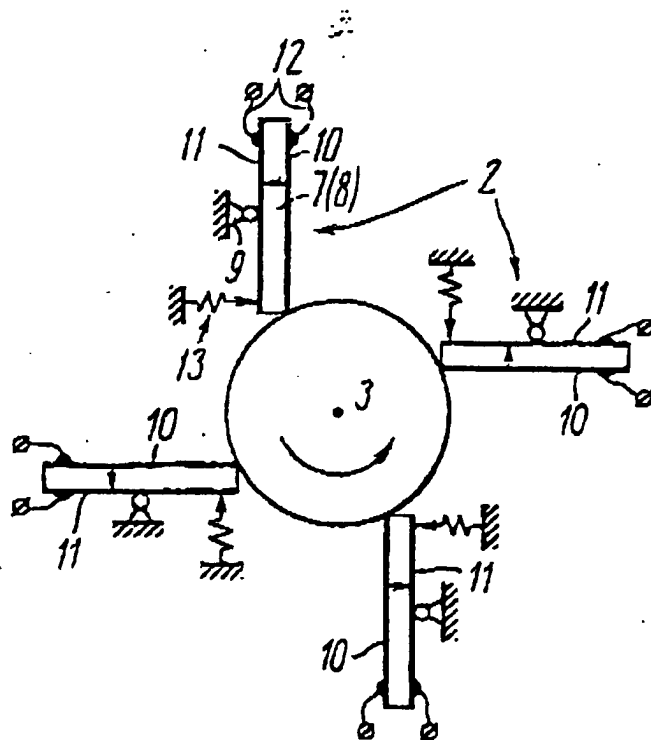


FIG. 3

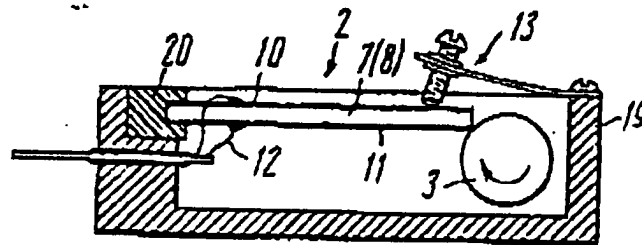


FIG. 4

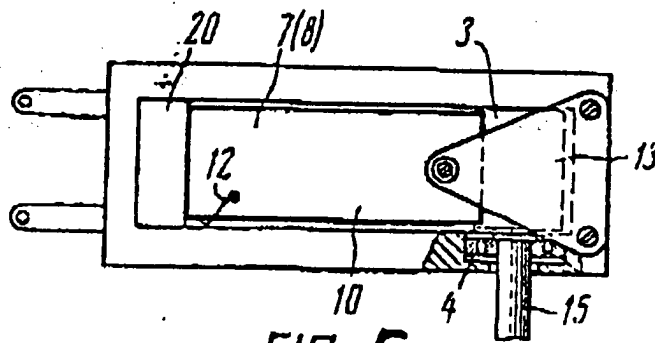


FIG. 5

Nummer: 25 30 045
Int. Cl.⁴: B 06 B 1/06
Veröffentlichungstag: 12. Dezember 1985

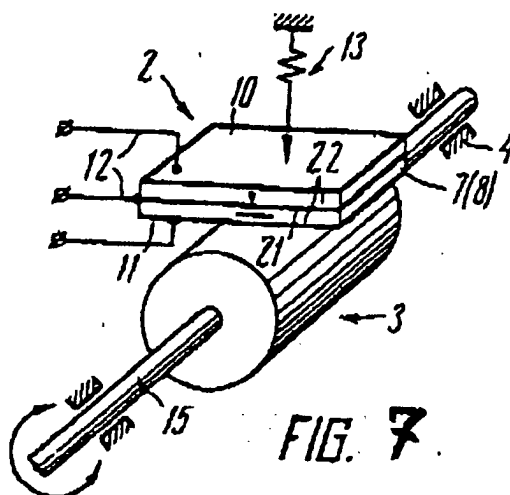
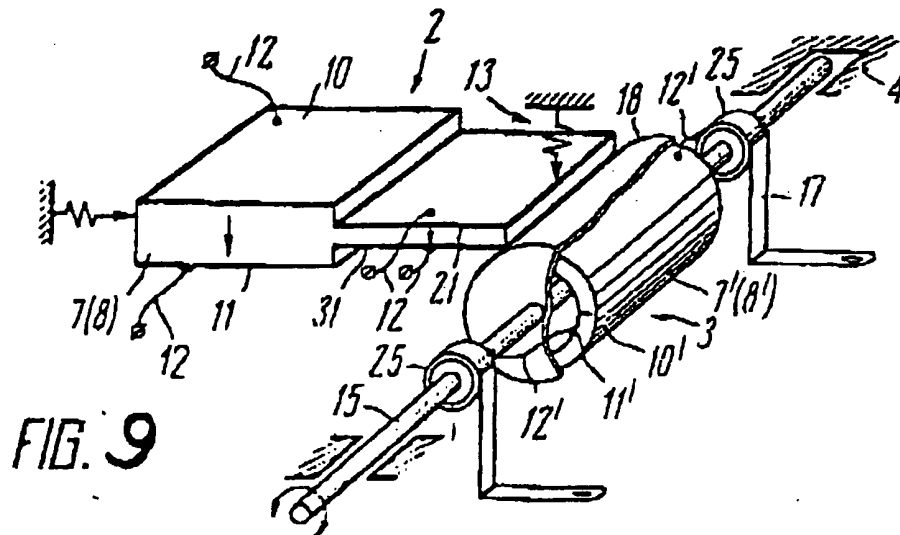
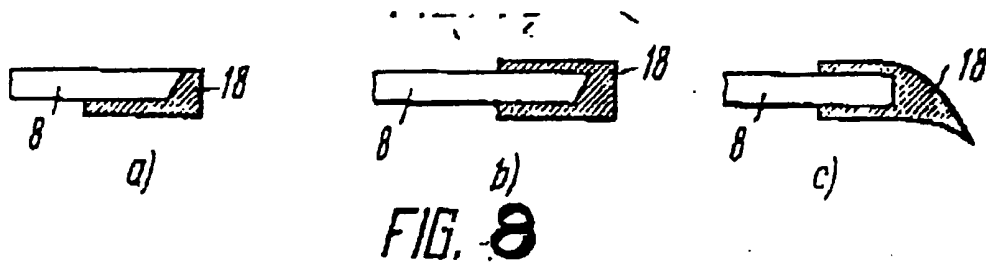


FIG. 7



ZEICHNUNGEN BLATT 7

Nummer: 25 30 045
 Int. CL⁶: B 06 B 1/06
 Veröffentlichungstag: 12. Dezember 1985

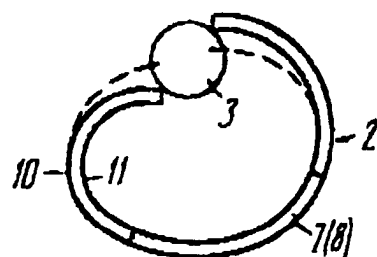


FIG. 10

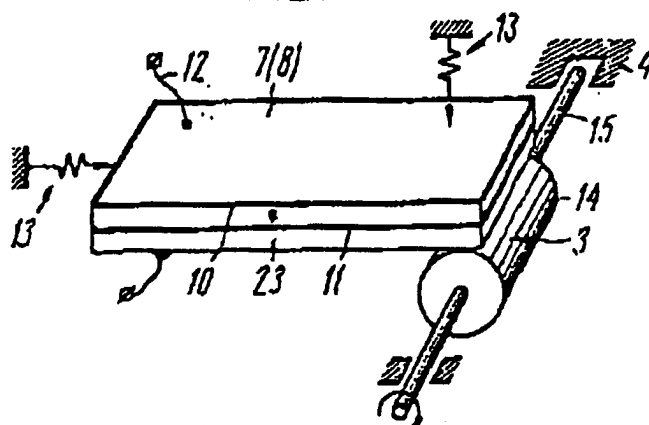


FIG. 11

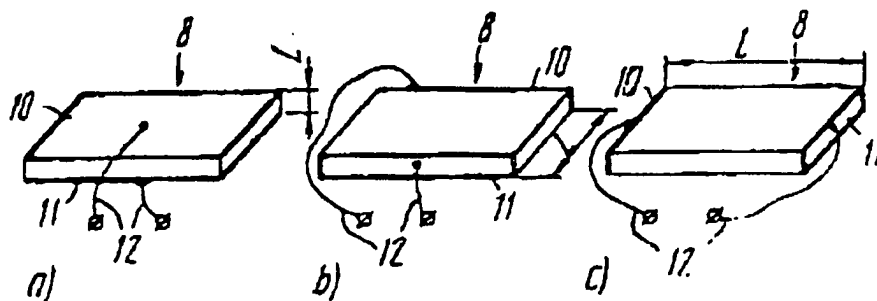


FIG. 12

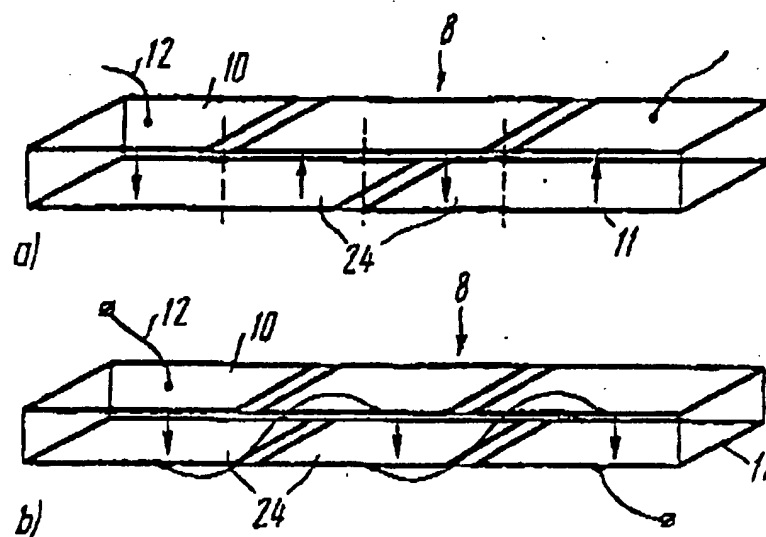


FIG. 13

Nummer:

25 30 045

Int. CL⁴:

B 06 B 1/06

Veröffentlichungstag: 12. Dezember 1985

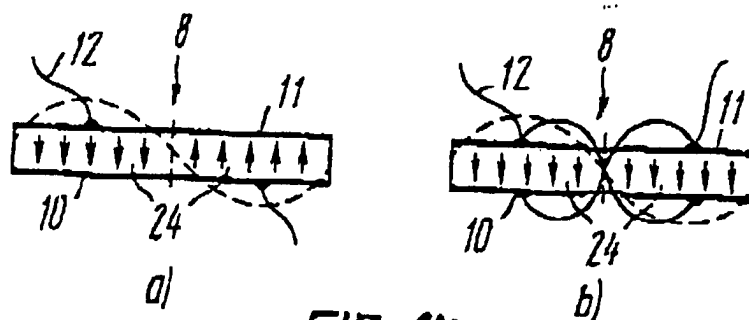


FIG. 14

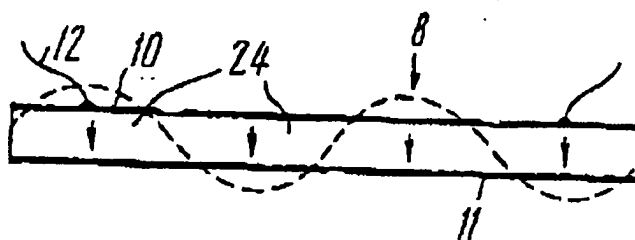


FIG. 15

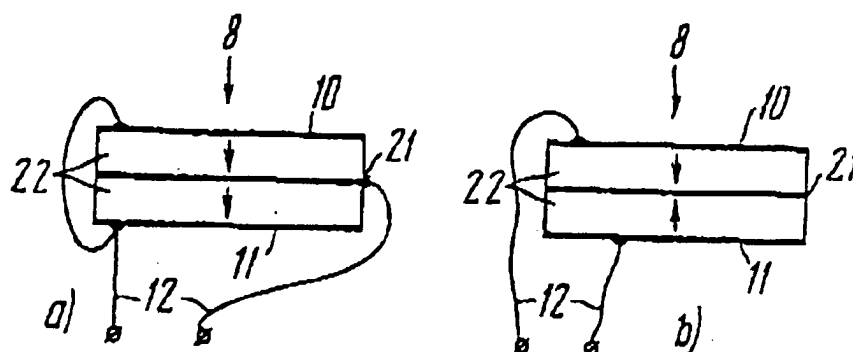


FIG. 16

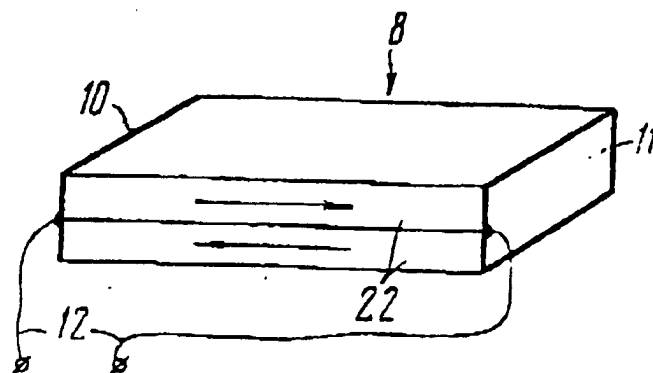


FIG. 17

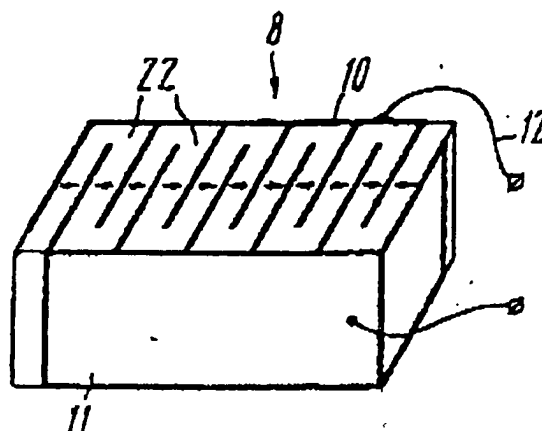
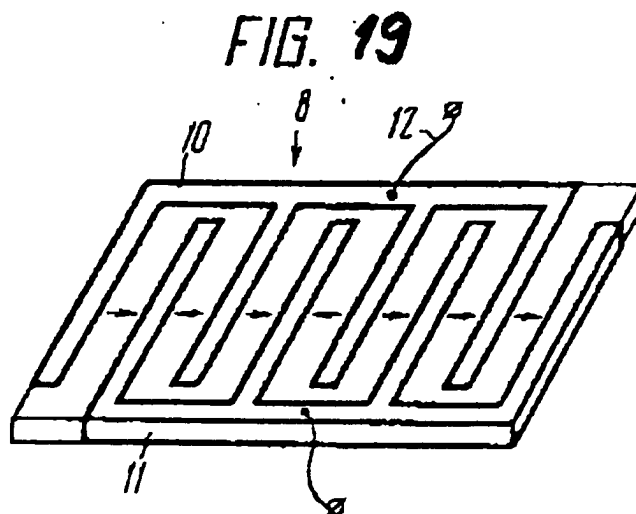


FIG. 18



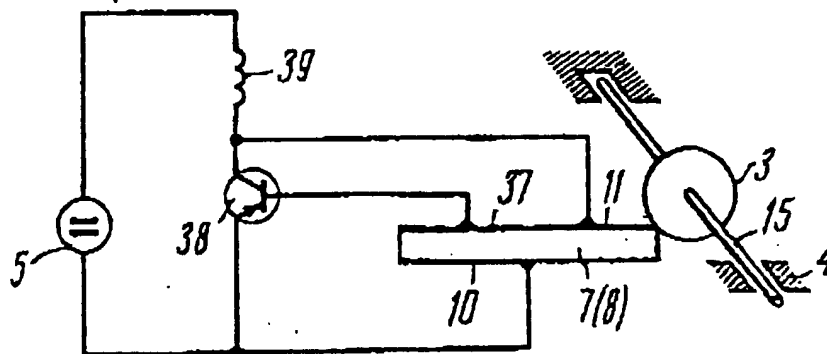


FIG. 20

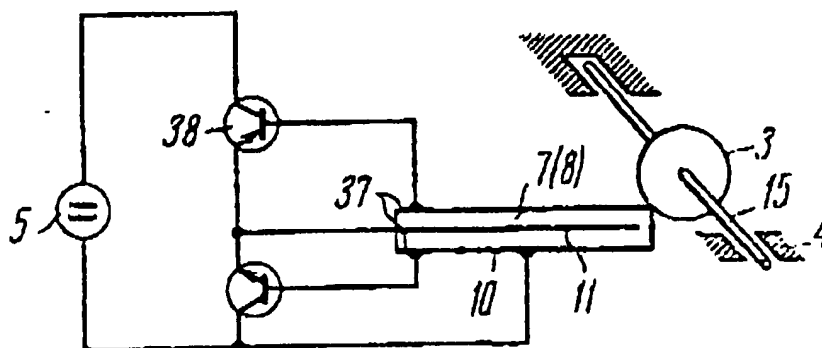
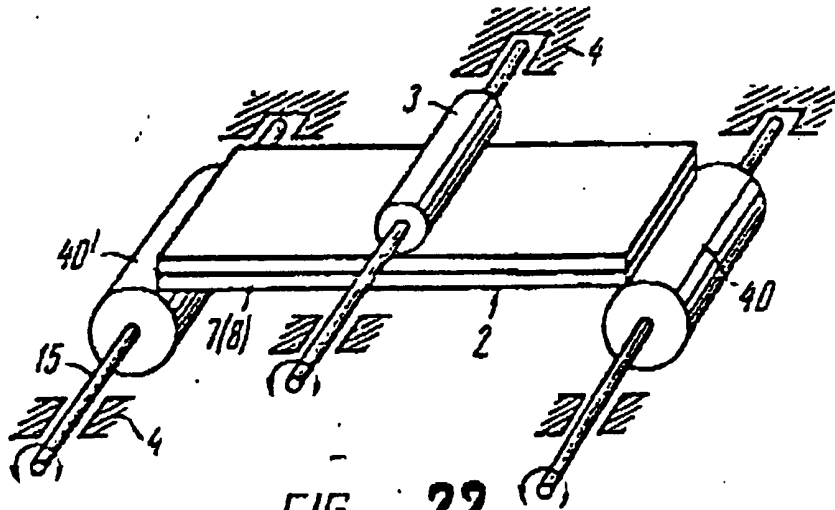
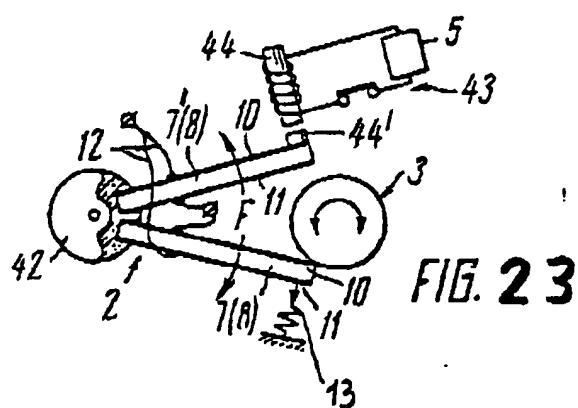


FIG. 21





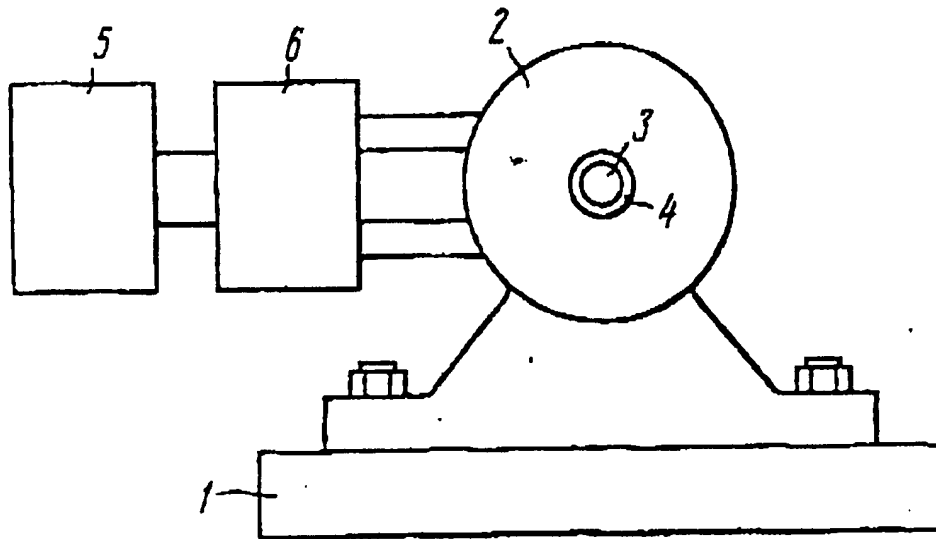


FIG. 1

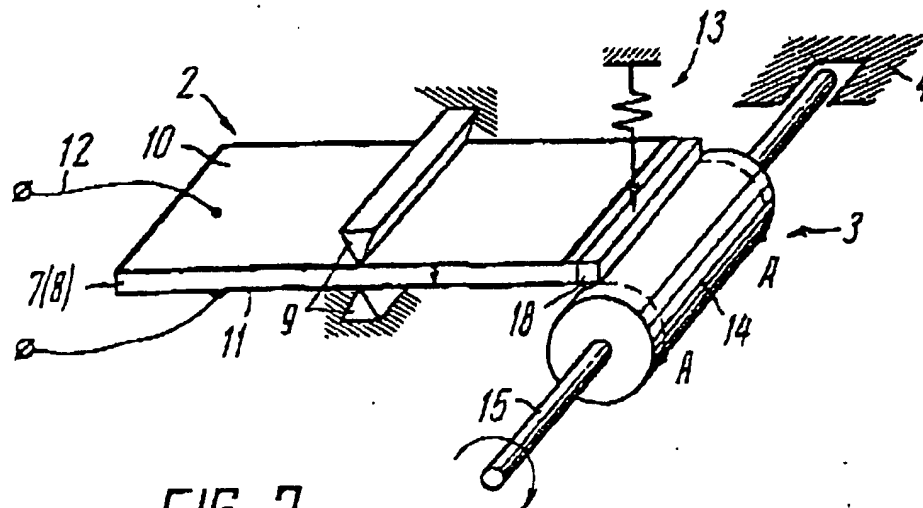


FIG. 2